

仪表技术

一种二自由度并联摇摆台运动分析与仿真

王海东¹ 毕玉泉¹ 杨 超² 杨炳恒¹

(海军航空工程学院青岛分院¹, 青岛 266041; 91379 部队², 青岛 266041)

摘要 根据“菲涅耳”光学助降装置发射光束的稳定性设计要求, 提出采用一种二自由度并联驱动摇摆台来检验该装置随动系统的稳定性能。采用解析法建立了该试验台的运动方程, 算例仿真分析结果表明: 通过驱动主运动支链杆长的移动, 可以实现既定规律下运动平台的横摇和纵摇运动, 完全满足“菲涅耳”光学助降装置的性能测试要求。

关键词 “菲涅耳”光学助降装置 并联摇摆台 横摇运动 纵摇运动

中图法分类号 TH113.22; **文献标志码** A

美国现代大型航母上都安装有“菲涅耳”光学助降装置, 如图 1 所示, 为返航着舰的固定翼舰载机提供 $3.5^{\circ} \sim 4^{\circ}$ 的下滑角, 辅助飞行员进行着舰。由于航母的海上运动是一种六自由度的随机复杂运动(包括横摇、纵摇、摇艏、垂荡、横荡和纵荡), 为保证“菲涅耳”光学助降装置中央灯箱发射光束的稳定性, 需要通过随动系统来补偿舰船的纵摇和横摇运动, 从而为飞行员提供一个稳定的光学下滑道^[1,2]。



图 1 菲涅耳光学助降装置

为了在陆基环境下进行光学助降装置发射光束的稳定性校验试验, 需要在实验室里提供一个可

模拟航母在水面运动的载体, 仿真舰船的横摇和纵摇运动, 以此验证光学助降装置的发射光束是否满足下滑道稳定性要求^[3—5]。

现设计了一种新型二自由度并联驱动摇摆台, 如图 2 所示, 可以对“菲涅耳”光学助降装置的发射光束稳定性进行检测, 测试其随动伺服控制系统是否达到设计要求。

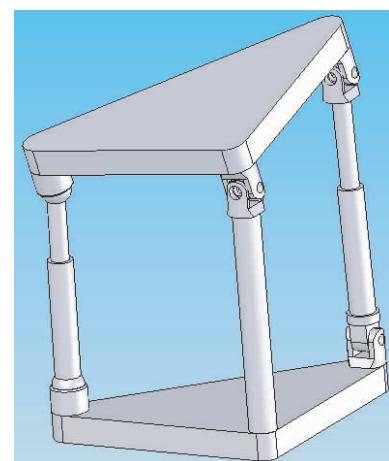


图 2 二自由度并联摇摆台 CAD 模型

1 摆摆台机构特点及自由度分析

1.1 机构设计特点

为了实现航母横摇、纵摇运动的模拟环境, 摆

摆台采用 T-RPT-SPS 并联机构形式(T 表示虎克铰链,R 表示转动副,P 表示移动副,S 表示球铰链),运动平台具有两个转动自由度,如图 3 所示。机构由静平台 $A_1A_2A_3$ 、运动平台 $B_1B_2B_3$ 、无约束支链 A_2B_2 和两条恰约束支链 A_1B_1, A_3B_3 构成。其中,恰约束支链 A_3B_3 的一端与动平台用虎克铰连接,另一端垂直固定在静平台上;恰约束支链 A_1B_1 的一端与动平台用虎克铰连接,另一端与静平台用转动副连接,转动副的轴线与上端虎克铰链的一条转轴相互平行;无约束支链 A_2B_2 的两端采用球铰与动、静平台相连。

该摇摆台的结构设计具有如下特点:动平台具有三条支撑腿,属于并联闭环机构,因此具有很高的支撑刚度和承载能力;此外,由于采用三条腿并联支撑运动平台,末端执行元件累积制造和装配误差小,具有较高的精度。

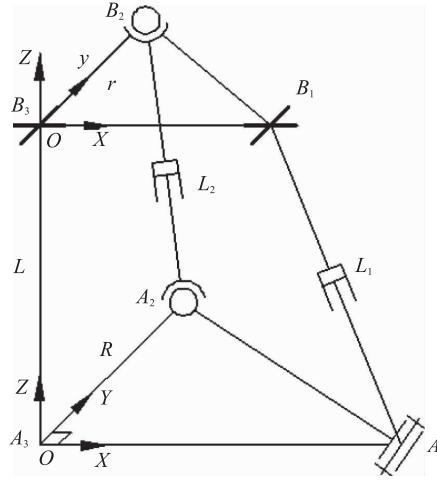


图 3 T-RPT-SPS 二自由度并联摇摆台机构简图

1.2 自由度分析

根据 Kutzbach grubler 公式,空间机构的自由度数可由下式计算^[6]:

$$M = d(n - g - 1) + \sum_{i=1}^g f_i \quad (1)$$

式(1)中 M 为机构自由度数; d 为环路阶数; n 为构件数; g 为运动副数; f_i 为第 i 个运动副的自由度数。

由于支链 A_3B_3 绕自身轴线的转动为局部自由度,且恰约束支链 A_1B_1 和支链 A_2B_2 有一个公共约束,即都限制了绕着垂直于动平台虎克铰两个转轴

方向的转动。因此,根据式(1)可得:

$$M = (6 - 1) \times (6 - 7 - 1) + (1 \times 3 + 3 \times 2 + 3 \times 1) = 2。$$

如图 3 所示,恰约束支链 A_1B_1 限制了动平台绕虎克铰正交轴线方向即 z 轴的转动和沿 x, y 和 z 轴方向的移动,可知运动平台能够实现绕 x 和 y 轴方向的转动,正好满足航母横摇、纵摇运动的模拟环境实现。

2 摆摆台运动分析

2.1 位置分析

当驱动液压缸活塞杆 L_1 和 L_2 运动时,采用坐标变换法可以求解运动平台的姿态,即舰船的横摇运动和纵摇运动。建立如图 3 所示的坐标系,其中 $R:OXYZ$ 为固定在静平台上的基础坐标系, $R':oxyz$ 为固定在动平台上的动坐标系,组成动平台和静平台的等腰直角三角形边长分别由 r 和 R 表示,固定杆长 A_3B_3 长度为 L 。 $L_i(i=1,2)$ 为支链 $A_iB_i(i=1,2)$ 的矢量, $A_i(i=1,2,3)$ 为点 A_i 的位矢, $B_i(i=1,2,3)$ 为点 B_i 的位矢。

运动坐标系原点 o 在基础坐标系下表示为

$$C^R = [0 \ 0 \ L]^T \quad (5)$$

位矢 A_i 在基础坐标系下表示为

$$\begin{cases} A_1^R = [R \ 0 \ 0]^T \\ A_2^R = [0 \ R \ 0]^T \\ A_3^R = [0 \ 0 \ 0]^T \end{cases} \quad (6)$$

位矢 B_i 在动坐标系下表示为

$$\begin{cases} B_1^{R'} = [r \ 0 \ 0]^T \\ B_2^{R'} = [0 \ r \ 0]^T \\ B_3^{R'} = [0 \ 0 \ 0]^T \end{cases} \quad (7)$$

位矢 B_i 在基础坐标系下表示为

$$B_i^R = TB_i^{R'} + C^R \quad i=1,2,3 \quad (8)$$

$$T = \begin{bmatrix} \cos\beta & \sin\beta\sin\alpha & \sin\beta\cos\alpha \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ -\sin\beta & \cos\beta\sin\alpha & \cos\beta\cos\alpha \end{bmatrix} \quad (9)$$

式(9)中, T 为动坐标系 R' 与固定坐标系 R 的坐标变换矩阵^[6], α, β 为动平台绕虎克铰链两个转轴转

动的姿态角。将式(7)、式(9)代入式(8)可得位矢

B_i 在基础坐标系下表示为:

$$\begin{cases} B_1^{\mathcal{R}} = [r\cos\beta \quad 0 \quad L - r\sin\beta]^T \\ B_2^{\mathcal{R}} = [r\sin\beta\sin\alpha \quad r\cos\alpha \quad r\cos\beta\sin\alpha + L]^T \\ B_3^{\mathcal{R}} = [0 \quad 0 \quad L]^T \end{cases} \quad (10)$$

机构具有如下几何约束条件:

$$\|B_i^{\mathcal{R}} - A_i^{\mathcal{R}}\| = \|L_i\| = L_i, i=1,2,3 \quad (11)$$

将式(11)展开, 可得该并联摇摆测试台的位置方程

$$\begin{cases} (r\cos\beta - R)^2 + (L - r\sin\beta)^2 = L_1^2 \\ (r\sin\beta\sin\alpha)^2 + (r\cos\alpha - R)^2 + (r\cos\beta\sin\alpha + L)^2 = L_2^2 \end{cases} \quad (12)$$

从式(12)可以看出, 若要并联摇摆测试台按设定的规律运动, 从而进一步对“菲涅耳”光学助降装置发射光束的稳定性进行测试, 只需要实时控制主运动支链中两个液压缸活塞杆的位移即可。

2.2 速度分析

对式(12)进一步求导整理可得并联摇摆测试台的速度方程^[7]

$$(R\sin\beta - L\cos\beta)r\dot{\beta} = L_1\dot{L}_1 \quad (13)$$

$$(R\sin\alpha + L\cos\beta\cos\alpha)r\dot{\alpha} - Lr\sin\beta\sin\alpha\dot{\beta} = L_2\dot{L}_2 \quad (14)$$

3 算例仿真

取摇摆台并联机构的结构参数为: 静平台参数 $R = 2000$ mm, 动平台参数 $r = 1200$ mm, 支链 A_3B_3 的固定杆长 L 为 1200 mm, 仿真时间 32 s。

根据实际要求, “菲涅耳”光学助降装置摇摆测试台的最终目标是期望运动平台的横摇角 α 和纵摇角 β 按照设定的规律变化, 以便检测其随动伺服控制系统是否满足设计的要求, 验证中央灯箱发出的光束是否是稳定的。在此假定 α 、 β 分别按照正弦运动规律变化: 绕 x 轴转动的横摇角度 α 的幅值为 15° , 初始相位为 0° ; 绕 y 轴转动的纵摇角度 β 的幅值为 30° , 初始相位为 270° 。由此可写出 α 和 β

的运动方程:

$$\alpha(t) = \frac{\pi}{12}\sin\left(\frac{\pi}{4}t\right) \quad (15)$$

$$\beta(t) = \frac{\pi}{6}\sin\left(\frac{\pi}{4}t + \frac{3}{2}\pi\right) = -\frac{\pi}{6}\cos\left(\frac{\pi}{4}t\right) \quad (16)$$

应用式(12)~式(14)求解结果, 在 32 s 内绘制了各驱动构件的位移、速度变化规律如图 4、图 5 所示。

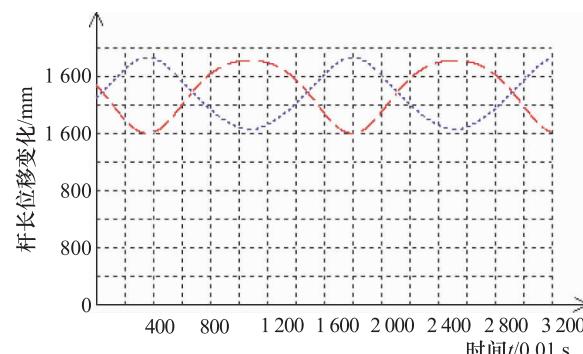


图 4 二自由度并联摇摆台杆长位移曲线

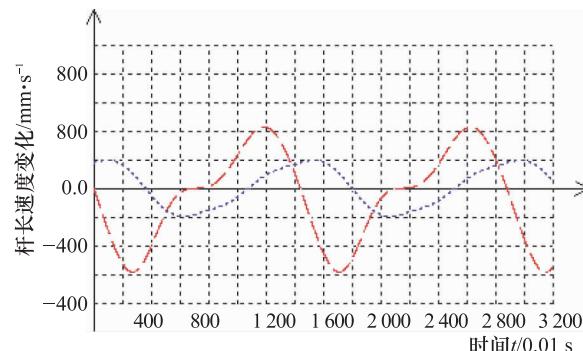


图 5 二自由度并联摇摆台杆长速度曲线

4 结论

采用 T-RPT-SPS 结构形式的并联摇摆台具有两个自由度, 运动平台可以实现绕着 x 轴和 y 轴转动, 能够模拟舰船的横摇和纵摇运动, 具有很高的精度和承载能力; 通过驱动二个主运动支链 L_1 和 L_2 液压缸活塞杆的移动, 可以实现既定规律下运动平台的横摇和纵摇运动, 用来对“菲涅耳”光学助降装置的随动控制系统进行性能测试, 以验证中央灯箱发

出的光束相对于舰船运动是否稳定。

参 考 文 献

- 1 欧 讯. 航母舰载机的着舰助降装置. 现代舰船,2005;(8):44—47
- 2 杨一栋,胡建兴,卢永锦. 光学着舰助降系统. 北京:国防工业出版社,2008
- 3 赵江波,王军政,汪首坤,等. 四自由度摇摆台的研制. 液压与气动,2003;(10):5—7

- 4 梁利华,张松涛,梁燕华. 基于 PMAC 的三轴海浪模拟摇摆台设计. 机床与液压,2005;(9):117—119
- 5 刘 军,蔡 萍,吉小军,等. 一种新的三自由度摇摆台位置逆解及仿真. 组合机床与自动化加工技术,2009;(1):39—42
- 6 黄 真,孔令富,方跃法. 并联机器人机构学理论及控制. 北京:机械工业出版社,1996
- 7 王海东,黄 葵,毕玉泉,等. 一种两转动一平移并联机构的运动学分析. 机械传动,2011;(1):32—34

Kinematics Analysis and Simulation of the Two Degrees of Freedom Parallel Tilter

WANG Hai-dong¹, BI Yu-quan¹, YANG Chao², YANG Bing-heng¹

(Qingdao Branch of Naval Aeronautical Engineering Institute¹, Qingdao 266041, P. R. China; 91379 Army², Qingdao 266041, P. R. China)

[Abstract] According to the stability requirement of the emissive beam in fresnel lens optical landing aid system, the parallel tilter with two degrees of freedom which can try out stable performance of the servo in the system is put forward. The kinetic equation of test platform is constructed based on the analytical method, simulation result indicates that the parallel test tilter can realize the rolling and pitching motion which follows the ordering principles by driving the motion of the piston rod in the main branching chain, and satisfy the property testing of the Fresnel lens optical landing aid system.

[Key words] the Fresnel lens optical landing aid system the parallel tilter the rolling motion the pitching motion